

# 基于复杂网络和暂态能量函数的支路暂态脆弱性评估

黄燕<sup>1</sup>, 李华强<sup>1</sup>, 黄涛<sup>2</sup>, 李迁<sup>1</sup>, 郑国<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省大英县供电有限责任公司, 四川 遂宁 629300)

**摘要:** 电力系统在遭受大扰动后失稳可能造成严重后果, 甚至引发灾难性事故。基于结构保持模型的多机电力系统暂态能量函数求解各支路势能。结合复杂网络的有向电气介数, 考虑发电机出力变化对支路潮流的影响, 计算出支路的状态脆弱性以及支路在系统结构中的重要程度。最后, 基于结构和状态两因子构建了综合脆弱度指标, 对电力系统支路的状态脆弱性进行了综合评估。通过对6机系统进行仿真计算, 验证了该方法能够有效地判断故障后系统的脆弱支路以及临界机群。

**关键词:** 输电线路; 暂态脆弱性; 暂态能量函数; 有向电气介数; 脆弱性评估

## Branch transient vulnerability assessment based on the complex network and transient energy function

HUANG Yan<sup>1</sup>, LI Hua-qiang<sup>1</sup>, HUANG Tao<sup>2</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, ZHENG Guo<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Smart Grid Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Sichuan Daying Electric Power Supply Co., Ltd., Suining 629300, China)

**Abstract:** The consequence of instability after power system subjected to large disturbance is very serious, even leads to catastrophic accidents. This paper uses multi-machine power system transient energy function based on the structure preserving models to get potential energy of each branch. Then combined the directed electric betweenness of complex network which fully considers the impact of generator output changes to branch power flow, branch state vulnerability and the importance of branch in the system are calculated. Finally a comprehensive vulnerability index is built to assess branch transient vulnerability, which considers the state and structure simultaneously. Simulation results on the 6 machine system prove that this method can identify the vulnerable lines and the critical machines effectively.

**Key words:** transmission line; transient vulnerability; transient energy function; directed electric betweenness; vulnerability assessment

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0069-06

## 0 引言

近年来, 随着电网规模的不断扩大, 系统元件越来越复杂, 影响电力系统安全稳定运行的因素越来越多, 严重时局部故障甚至影响整个电网。因此, 对电力系统进行脆弱性评估, 通过对预想事故分析, 计算各种故障后输电线路的脆弱性, 找出电网中存在的脆弱环节, 提前进行预防和控制, 提高电网的抗干扰能力和故障承受能力<sup>[1]</sup>。

目前, 电力系统脆弱性理论可分为结构脆弱性和状态脆弱性<sup>[2]</sup>。国内外文献表明, 不少学者深入研究了电力网络结构以及元件的稳态运行状态, 进行静态脆弱性分析<sup>[2-4]</sup>, 即在确定的运行方式下, 基

于线路的拓扑结构和系统参数定义脆弱性指标, 其系统整体或元件的脆弱性为定值。而传统的暂态稳定分析<sup>[5]</sup>对系统遭受大扰动后能否保持稳定及其稳定裕度的大小方面进行深入探索, 对暂态过程中系统重要元件的暂态脆弱性研究相对较少。

文献[6]提出了一种基于能量函数的暂态稳定概率评估方法, 通过分析能量裕度的变化来计算故障后系统稳定指标。文献[7]考虑天气因素, 运用概率理论和范数理论, 借助暂态能量裕度评估了电力系统脆弱性, 提出了电力系统的脆弱性指标的算法。但是这些都是基于收缩至发电机内节点的降阶导纳矩阵模型, 求解系统的暂态能量裕度, 从全局角度考虑暂态脆弱性, 电网拓扑结构特征被弱化,

故障对网络元件的影响没有计及。文献[8]提出了计及电网拓扑结构与负荷特点的保留结构的能量函数法,但是暂态能量表达式复杂、信息采集量大。文献[9]在电力系统网络信息的动态响应轨迹基础上,依赖网络信息,构建了可定性、定量评价系统暂态稳定性的方法支路势能法,在辨识临界割集与脆弱线路方面取得了较好效果。

考虑到复杂网络理论,通常采用度数或者介数<sup>[10-13]</sup>模型来进行电网结构脆弱性评估,都是静态地考虑支路本身开断对系统连通性、最大传输能力、失负荷比例的影响。文献[14]考虑发电机出力变化、系统能量裕度变化及其与支路潮流变化之间的关系,采用非线性优化的思路,提出支路结构脆弱性指标。本文运用结构保持模型的暂态能量函数法,运用时域仿真求解故障发生后支路势能,判断支路的状态脆弱性,结合有向电气介数<sup>[15]</sup>,考虑了发电机出力对输电线路潮流的占用情况,对网络支路从状态和结构两方面进行了综合暂态脆弱性评估,建立支路暂态脆弱性综合指标。

## 1 基于暂态能量函数法的状态脆弱性评估

### 1.1 系统动态方程

假设采用有  $m$  台发电机,  $n_0$  条母线,  $l_0$  条线路的多机系统,采用发电机经典模型和负荷恒阻抗模型,忽略调速器作用,网络中计及发电机暂态电抗,则增广网络为  $n_0+m=n$  条母线,  $l_0+m=l$  条线路。若忽略线路电阻,惯性中心 COI 坐标系下的系统方程为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} T_{ji} \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{T_{ji}}{T_{JT}} P_{COI} \\ \dot{\delta}_i = \omega_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

式(1)满足如下关系:

$$P_{ei} = \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij} U_j E_i \sin \delta_{ij} \quad (2)$$

$$T_{JT} = \sum_{i=1}^m T_{ji} \quad (3)$$

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^m (P_{mi} - P_{ei}) \quad (4)$$

式中:  $\omega_i$ 、 $\delta_i$  为发电机  $i$  相对于惯性中心 COI 的转子角速度和转子角;  $P_{mi}$ 、 $P_{ei}$ 、 $P_{COI}$  分别为发电机机械功率、电磁功率和中心加速功率;  $T_{ji}$  为发电机惯性时间常数;  $U_i$  为节点电压;  $E_i$  为发电机恒定内电势;  $B_{ij}$  为节点间电纳。

忽略线路电阻,系统的潮流方程为

$$\begin{cases} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij} U_i U_j \sin \theta_{ij} = 0 \\ Q_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij} U_i U_j \cos \theta_{ij} - B_{ii} U_i^2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$ 、 $U_i$  分别为第  $i$  个节点的有功功率、无功功率和电压幅值;  $\theta_{ij}$  为  $i$ 、 $j$  两节点电压的相位差。

### 1.2 支路势能

若连接支路  $k$  两端节点  $i, j$  的电压相角为  $\theta_i, \theta_j$ , 支路两端的相角差为  $\theta_k = \theta_i - \theta_j$ 。忽略发电机和线路上的阻尼,则多机系统的能量函数<sup>[16]</sup>可以表示为

$$V = V_{KE} + V_{PE} = \frac{1}{2} \sum_{g=1}^m M_g \omega_g^2 + \sum_{k=1}^l \int_{\theta_k^s}^{\theta_k} [P_k(u) - P_u^s] du \quad (6)$$

式中:  $V$  为系统的总能量;  $V_{KE}$  为系统的动能;  $V_{PE}$  为系统的势能;  $\omega_g$  为第  $g$  台发电机的角速度;  $M_g$  为第  $g$  台发电机的转动惯量;  $P_k(\theta_k)$  为第  $k$  条支路的有功潮流;  $P_k(\theta_k^s)$ 、 $\theta_k^s$  为第  $k$  条支路在相对于故障后平衡状态下的有功潮流与相角差。

网络中任意一条支路  $k$  的势能,均是沿有功潮流与相角参数轨迹的积分:

$$V_{PEk}(\theta_k) = \int_{\theta_k^s}^{\theta_k} [P_k(u) - P_k^s] du \quad (7)$$

支路  $k$  势能在时间上的导数可以表示为

$$\dot{V}_{PEk}(t) = [P_k(\theta_k(t)) - P_k^s] \omega_k(t) \quad (8)$$

式中,  $\omega_k(t)$  为支路相角差  $\theta_k(t)$  的时间导数。

式(7)也可以表示为关于时间变量的函数:

$$V_{PEk}(t_k) = \int_{t_k^s}^{t_k} [P_k(\theta_k(u)) - P_k^s] \omega_k(u) du \quad (9)$$

### 1.3 支路状态脆弱性指标

当电网遭受大扰动时,大量的暂态能量注入系统中,故障后发电机转子的动能转化为增广网络的势能,如果网络能够吸收注入的动能,则系统能保持稳定,否则,系统将失去稳定。故障后,系统的暂态能量可能主要集中在某些支路上,而不是均匀分布于网络中每一支路。并随着系统稳定性的恶化,临界支路将更多地承担分布于网络中的暂态能量,网络中局部暂态能量的不平衡将导致电力系统失去稳定。

若电力系统发生失稳,则所有发电机将被“撕裂”成两部分,即临界机群  $\{K\}$  和非临界机群  $\{T-K\}$ 。在这过程中,每条线路承担的势能不同,切除时间越长,某些受暂态冲击最严重的相邻线路集合会聚

集越多的能量,最终形成临界割集。而系统中包含于某一个割集的输电线路,系统的运行状态将会剧烈变化。系统的动能在转化成暂态势能分布于网络的过程中,若该割集的输电线路分担的暂态势能超过其所承受的能力时,在该割集上系统将“撕裂”,该割集称为临界割集。

根据支路势能 $V_{PEk}$ 的变化特点综合分析,可以用支路在其第一次达到暂态势能最大值时刻 $t_{bk}$ 时, $[P_k(t_{bk})-P_k^s]$ 是否为零来判断该支路的稳定性。若 $[P_k(t_{bk})-P_k^s] \neq 0$ ,则支路有 $\omega_k(t_{bk})=0$ ,相角差 $\theta_k$ 在 $t_{bk}$ 时刻达到常数值,支路是稳定的;若 $[P_k(t_{bk})-P_k^s]=0$ ,且 $V'_{PEk}(t_{bk}-\varepsilon)>0$ , $V'_{PEk}(t_{bk}+\varepsilon)>0$ ,支路有 $\omega_k(t_{bk}) \neq 0$ 且 $\omega_k(t_{bk})>0$ ,该支路相角差 $\theta_k$ 将不断增大,支路是不稳定的。故障后支路上分担的暂态势能为首个极大值时刻势能与极小值时刻 $t_{ak}$ 的差值,支路暂态势能的分担量可以反映该支路受扰动影响的大小,临界支路暂态势能的分担量可以反映系统受扰动的程度。随着系统稳定性的逐步恶化,支路暂态势能 $V_{PEk}(t_{ak}, t_{bk})$ 将发生变化。支路的状态脆弱性指标可定义为

$$I_{V_k} = \frac{1}{V_{PEk}(t_{ak}, t_{bk})} \cdot \frac{[P_k(t_{bk}) - P_k^s]}{P_k^s} \quad k \in \{1, \dots, l\} \quad (10)$$

由上可知, $I_{V_k}$ 绝对值的大小则可以表征该支路的状态脆弱程度,若 $I_{V_k}$ 为零,则该支路非常脆弱。 $I_{V_k}$ 绝对值越小表示支路越容易受到冲击影响,支路越脆弱,是系统的薄弱环节。计算支路暂态能量沿故障轨迹的变化不仅考虑了故障相关性,而且用来分析网络中任意元件对系统暂态脆弱性的影响,进而可准确地分析系统的暂态脆弱性。

## 2 基于复杂网络的支路脆弱性评估

### 2.1 介数理论

在复杂网络中,考虑网络的拓扑结构,大多数模型中假设潮流沿最短路径传播,加权介数以及电气介数指标均可表征网络结构脆弱性<sup>[9-12]</sup>。从介数角度分析出系统高介数节点或支路在扰动下会变得很脆弱的结论。传统的介数定义为网络中所有发电机与负荷之间最短路径经过的次数。文献[11]提出的电气介数做出了一些改进,反映了“发电-负荷”节点之间潮流在线路的分布情况,同时反映了线路在网络中的活跃程度,可识别出系统中的关键线路,但不足之处是将系统看作无向加权网络,没有考虑系统当前运行状态以及潮流具有方向性。由于最短路径属于图论概念,并未结合电力系统的物理特征。

发电机与负荷间注入电流源后,电网潮流转移遵循基尔霍夫定律,系统除辐射线路外的所有线路都将承担发电机向负荷传输的功率。因此,传统的介数存在很大局限性。

### 2.2 有向电气介数

发电机节点 $i$ 向负荷节点 $j$ 传输有功功率 $P_{ij}$ 通常经过几条路径进行,而不同路径上传递的功率 $P_{ij}$ 大小也不相同,通过每条线路上的路径数也不尽相同,因此在传输功率 $P_{ij}$ 时不同线路承担的作用不同,在系统中重要程度也不同。可以认为在发电机节点 $i$ 向负荷节点 $j$ 传输功率时,线路传输的功率 $P_{ij}$ 越多,在系统中越重要。通过考虑所有经过线路的发电机与负荷节点对后,可以得到全网中线路的重要程度排序。根据现有模型的基本思想并结合电力网络潮流传播的特点,线路 $k$ 的有向电气介数<sup>[15]</sup>可定义为

$$B(k) = \sum_{i \in m, j \in l} P_{Gi} \frac{P_{ij}(k)}{P_{ij}} \quad (11)$$

式中: $P_{ij}(k)$ 为线路 $k$ 上承担的发电机节点 $i$ 向负荷节点 $j$ 传输的有功功率分量。有向电气介数 $B(k)$ 同时考虑了电力系统的运行状态以及网络结构,反映了不同线路承担“发电机-负荷”节点对之间潮流的情况,同时反映了线路在网络中的重要程度以及传输能力。

根据式(10)求取每条线路的有向电气介数,采用潮流追踪的方法,在增广网络节点支路关联矩阵基础上,分别计算发电机对线路功率的贡献,以及负荷对线路功率的取用,确定不同发电机以及负荷对线路潮流的影响。在此基础上,确定每台发电机向每个负荷传输的功率在各条线路上的分配情况,以及各条线路上承担的各发电机与各负荷间实际的传输功率。当故障发生后,由于网络潮流分布改变,支路 $k$ 的电气介数 $B(k)$ 可以反映支路在系统网络结构中的重要程度,其值越大,表示切除该线路对系统影响程度越大。

## 3 支路综合脆弱性评估模型

当忽略负荷的动态特性,不计励磁调节器以及发电机的调速器作用的情况下,影响系统暂态稳定性的因素主要有:网络的结构参数、初始运行功率、发电机转动惯量、故障切除时间、故障类型以及故障在网络中所处的位置。本文在考虑脆弱性评估模型时,将暂态稳定性与复杂网络理论相结合,综合考虑电网运行状态与结构两脆弱因子,从这两个方面对电力系统脆弱性进行综合评估。

### 3.1 支路综合脆弱性评估指标

在系统受到大的扰动时，虽然线路易受冲击影响，发生故障后容易发生失稳，但是线路在网络中承担的传输功率较小，退出运行后，对整个系统影响不大。某些线路虽然受冲击影响不大，不容易发生失稳，但是其在网络中有向电气介数较高，退出运行后对系统的影响很大。因此，支路的脆弱性应考虑其自身的运行状态的同时结合其在网络中的重要程度。本文提出支路脆弱性的综合评估模型，将有向电气介数的倒数作为结构因子，支路状态脆弱性指标乘以结构因子，可以定义支路的综合脆弱性指标  $W_k$  为

$$W_k = \frac{I_{V_k}}{B(k)} \quad (12)$$

式中： $I_{V_k}$  表示支路  $k$  抵抗扰动能力的大小； $I_{V_k}$  越小表示支路状态脆弱度越大；有向电气介数  $B(k)$  反映了支路  $k$  在网络结构的活跃程度，其倒数越小，表示支路  $k$  在系统中越重要。

本文支路综合脆弱性评估指标  $W_k$  的物理意义为：支路  $k$  受扰动影响越大，越不稳定，状态脆弱度越高，且在系统结构中活跃程度越高，则支路  $k$  越脆弱，相当于有向电气介数作为结构因子将支路状态脆弱程度有效放大；因此，综合脆弱性评估指标  $W_k$  越小，支路越脆弱。

### 3.2 算法流程

(1) 输入原始数据，潮流数据，确定初始条件以及故障前稳定平衡点  $\delta_i^0$ ，形成故障前系统的增广网络矩阵。

(2) 根据式(1)~式(5)进行时域仿真，求解故障轨迹，计算故障切除时刻  $t_c$  对应的发电机转子角速度  $\omega_i^c$  及转子角  $\delta_i^c$ 。

(3) 形成故障后系统的节点导纳矩阵，并根据  $\delta_i^0$  求解故障后稳定平衡点，求解出支路  $k$  的有功功率  $P_k(\theta_k^s)$  以及相角差  $\theta_k^s$ 。

(4) 根据时域仿真以及式(7)、式(9)搜索支路  $k$  的第一个势能极大值点  $t_{bk}$  及极小值点  $t_{ak}$ ，计算出  $P_k(t_{bk})$ 、 $V_{PEk}(t_{ak}, t_{bk})$ ，根据式(10)可以得到状态脆弱性指标  $I_{V_k}$ 。

(5) 运用潮流追踪的方法，根据式(11)可以计算出有向电气介数  $B(k)$ 。

(6) 根据式(12)计算得出支路综合脆弱性指标，评估支路的脆弱性，并进行排序，确定电力系统脆弱环节。

## 4 算例分析

为验证本文所提支路暂态脆弱性评估方法的有效性，对图 1 所示 6 机系统运用 Matlab 进行编程分析计算。图 2 为 6 机系统计及发电机节点的增广网络，本文对应系统结构选择了 8 种预想事故进行仿真，故障类型为三相短路，故障后网络结构不发生变化。下面对预想事故 1 进行分析，假设 0.1 s 变压器支路 32 号发生故障。

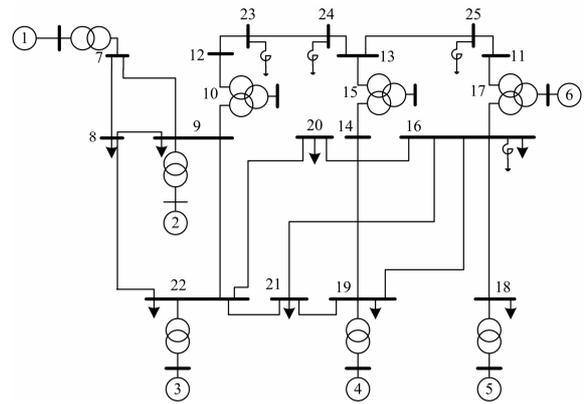


图 1 6 机系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 6-generator system

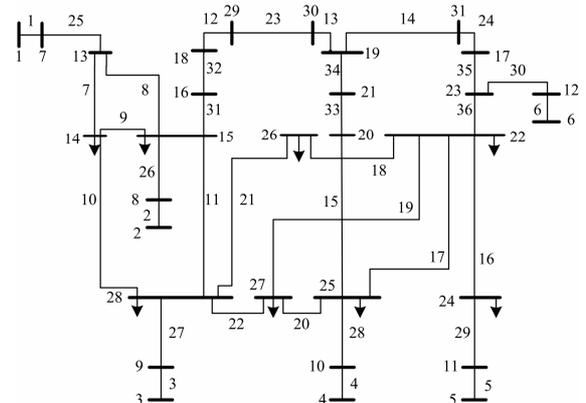


图 2 6 机系统增广网络示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 6-generator system augmented network

图 3 为故障切除时间为 0.2 s 时部分支路的暂态势能变化情况，这个时候系统的动能和势能相互转化，但是沿故障轨迹总的暂态能量是守恒的，各支路基本上都可以保持暂态稳定。

当延迟故障切除时间，系统的稳定情况会逐渐恶化，预想事故 1 在 0.21 s 之后切除故障，系统会失去稳定，因此 0.21 s 为系统当前故障下的临界切除时间。经过仿真分析，支路暂态势能幅值越小越稳定，系统的势能越来越集中在支路 2、25 和 29

上,系统的暂态稳定性逐步下降,最终系统的同步运行将在这3条支路上“撕开”。这时系统发生局部失稳,机组{1,2}为系统的临界机群,支路{2,25,29}为系统的临界支路,是影响系统暂态稳定的关键环节。

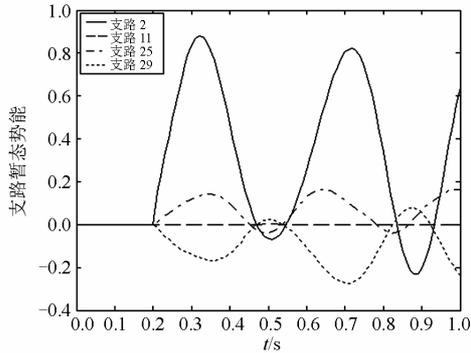


图3 支路2、11、25、29的暂态势能 ( $t_c=0.2$  s)

Fig. 3 Transient potential energy of line 2, 11, 25, 29 ( $t_c=0.2$  s)

经计算分析,表1是在故障切除时间为0.2 s时计算的各支路脆弱性的排序。此时,支路2、25、29为系统的临界支路。

表1 预想事故下部分支路的脆弱性排序

Table 1 Vulnerability indices ranking of part of lines based on preset-contingences

排序	支路编号	状态脆弱性 $I_{rk}$	综合脆弱性 $W_k$
1	2 (2-8)	1.29	0.021 3
2	25 (7-13)	2.45	0.081 7
3	29 (11-24)	2.98	0.135
4	5 (5-11)	3.62	0.090 3
5	26 (8-15)	5.31	0.147
6	8 (13-15)	12.15	0.338
7	27 (9-28)	15.78	1.052
8	28 (10-25)	17.26	1.752
9	30 (6-23)	21.37	1.283
10	36 (23-22)	37.23	3.576

根据分析计算,虽然支路29的状态脆弱性较脆弱,但是在系统结构中承担的传输潮流较少,有向电气介数较小,在系统结构中重要程度较小,因此综合脆弱性与支路5相比就更坚强。而支路36尽管状态脆弱性较坚强,但是系统中承担的传输潮流较重,切除后对系统影响较大,其综合脆弱性与支路28相比就更脆弱。

通过对6机系统8种预想事故进行分析,根据仿真计算出的临界切除时间,以及分析得出不同故障对应的系统临界机群以及脆弱支路,结果如表2

所示。

表2 不同预想事故下系统的临界机群及脆弱支路

Table 2 Critical machines and vulnerable lines with respect to various preset-contingences

故障支路	临界切除时间/s	临界机群	脆弱支路
25 (7-13)	0.22	{1}	{1,7,8}
7 (13-14)	0.20	{1}	{1,25,8}
8 (13-15)	0.24	{1}	{1,26,7}
11 (15-28)	0.19	{2}	{2,26,10}
31 (15-16)	0.19	{2}	{2,26,27}
32 (16-18)	0.20	{1, 2}	{2,25,29}
12 (18-29)	0.28	{1, 2}	{2,23,32}
23 (29-30)	0.27	{1, 2}	{2,26,29}

根据表2的结果,可以看出不同故障情况下,临界切除时间也不相同,越是脆弱的支路,临界切除时间越短。运用本文提出的方法对支路进行暂态脆弱性分析,不同故障情况下,系统的临界机群以及脆弱支路不同,失稳模式也不相同。通过预想事故分析,得出预防控制方案。当系统发生故障时,及时对故障进行处理,防止系统发生失稳带来严重损失。

## 5 结语

本文提出了基于结构保持模型的暂态能量函数法结合有向电气介数的支路暂态脆弱性综合评估方法。通过对预想事故进行仿真分析,考虑了发电机出力对输电线路潮流的占用情况,对线路从状态和结构两方面进行了综合评估,建立了支路暂态脆弱性综合评估指标。通过分析计算,可以快速判断容易失稳的脆弱支路以及临界机群,对算例的仿真分析验证了该方法的有效性。因此,可以利用该方法对电力系统网络中脆弱的支路进行识别,确定最易导致系统失步的线路,安装监控装置,为电力系统安全稳定运行提供有价值的指导信息。

## 参考文献

- [1] FOUAD A A, ZHOU Q, VITTAL V. System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 1009-1015.
- [2] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 11-14.  
WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. A new vulnerability evaluation model to power grid based on running state and structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 11-14.

- [3] 郑武, 李华强, 陈静, 等. 基于静态能量函数法的电压弱节点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 79-83.  
ZHENG Wu, LI Hua-qiang, CHEN Jing, et al. Voltage weak node assessment based on static energy function[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 79-83.
- [4] 钟嘉庆, 李颖, 卢志刚. 基于属性综合评价方法的电网脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 17-22.  
ZHONG Jia-qing, LI Ying, LU Zhi-gang. Power network vulnerability assessment based on attribute comprehensive evaluation method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 17-22.
- [5] 刘笙. 电力系统暂态稳定分析的能量函数方法[J]. 电网技术, 1995, 19(2): 11-17.  
LIU Sheng. Transient energy function analysis for power system stability[J]. Power System Technology, 1995, 19(2): 11-17.
- [6] 王成山, 余旭阳. 基于能量函数的暂态稳定概率分析方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 5-9.  
WANG Cheng-shan, YU Xu-yang. Transient stability probability analysis method based on fitting curve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 5-9.
- [7] 卢锦玲, 朱永利. 基于暂态能量裕度的电力系统脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 96-103.  
LU Jin-ling, ZHU Yong-li. Power system vulnerability assessment based on transient energy margin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 96-103.
- [8] BERGEN A R, HILL D J. A structure preserving model for power system stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(1): 25-35.
- [9] 蔡国伟, 穆钢, CHAN K W, 等. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析: 支路势能法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 1-6.  
CAI Guo-wei, MU Gang, CHAN K W, et al. Branch potential energy method for power system transient stability assessment based on network dynamic variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 1-6.
- [10] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.  
DING Ming, HAN Ping-ping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.
- [11] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.  
XU Lin, WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Electric-betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [12] 魏震波, 刘俊勇, 李俊, 等. 基于 P、Q 网分解的有向加权拓扑模型下的电网脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 19-22.  
WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, LI Jun, et al. Vulnerability analysis of electric power network under a directed-weighted topological model based on the P-Q networks decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 19-22.
- [13] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 131-137.  
WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.
- [14] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方, 等. 支路约束优化下的电网结构脆弱性研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 148-154.  
LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang, et al. Research on grid structural vulnerability based on optimal branch limit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 148-154.
- [15] 程临燕, 张保会, 李光辉, 等. 采用有向电气介数的脆弱线路选取[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(6): 91-96.  
CHENG Lin-yan, ZHANG Bao-hui, LI Guang-hui, et al. Search for vulnerable line based on directed electric-betweenness[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(6): 91-96.
- [16] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 135-215.  
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory & analysis of dynamic power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 135-215.

收稿日期: 2014-01-03; 修回日期: 2014-06-03

作者简介:

黄燕(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: hy500115@163.com

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 长期从事电压稳定及优化问题, 电网稳定与控制研究。